

用于 X 光激光实验的离轴球面反射镜线聚焦系统的研究*

袁晓东 魏晓峰 张小民 徐 冰 唐晓东 刘素萍
(高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室, 成都, 610003)

冯国英 吕百达
(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 本文对用于 X 光激光实验的离轴式线聚焦光学系统作了详细的理论与实验研究。该系统已成功地用于“星光[⊙]”激光装置的 X 光激光实验研究, 取得了良好的结果。

关键词: 离轴球面反射镜 象散 高纵横比

Study of the off-axis spherical mirror line focus system used for X-ray laser experiments

Yuan Xiaodong, Wei Xiaofeng, Zhang Xiaoming, Xu Bin, Tang Xiaodong, Liu Shuping
(Laboratory for Laser Fusion, Chengdu, 610003)

Feng Guoying, Lu Baida
(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: The properties of the off-axis line focus optical system for X-ray laser experimental research has been studied theoretically and experimentally in detail. The system has been successfully used in "Xing Guang[⊙]" laser facility for X-ray laser experiments and good results have been obtained.

Key words: off-axis spherical mirror astigmatism high aspect ratio

一、引 言

线聚焦是 X 光激光(XRL)研究中的一个重要组成部分。近十年来,为满足不断发展的高功率固体激光技术和 XRL 实验的要求,人们研制了多种线聚焦系统。为改善焦线上的光强分布,实现均匀线聚焦,人们发展了多种以透射式阵列化聚焦方式为基础的线聚焦系统并取得了很好的结果^[1~3]。然而,这些方式由于将光束分割成若干子束,增大了焦线的宽度,降低了靶面功率密度,在中小型激光器上的应用受到了很大的限制。由 I. N. Ross 等人提出并成功地用于 XRL 实验的离轴球面反射镜线聚焦方案较好地解决了这一问题^[4,5]。这种方案能获得线长可调,线宽可压窄的焦线,非常适合中小功率激光器获得高靶面功率密度,大纵横比的焦线,用于中 Z 以上元素的 XRL 实验。稍作变化,还可用于皮秒脉冲的线聚焦。针对“星光[⊙]”激光装置输出功率小,脉宽范围广的特点,我们建立了以离轴球面反射为基础的透射反射式和反射反射式线聚焦系统,开展了中 Z 以上元素的 XRL 实验,已取得了良好的实验结果。

二、线聚焦系统简述

* 国家高技术 863-410 资助。

1. 线聚焦原理简介

参照文献[4], 这种线聚焦方式为利用球面反射镜离轴反射产生的象散实现线聚焦如图 1 所示。将反射镜的截面看作是以 C 为圆心的圆的一部分, 轴线沿 PC 。点光源 P 通过球面镜反射, 在 PC 轴上成一线状象 Q 。参照图 1, Q 上各点与 P 点的相对关系为:

$$1/t = 1/a + 2\cos \varphi/R \quad (1)$$

$$t \sin(\theta + \varphi) = R\sin \theta = a\sin \phi \quad (2)$$

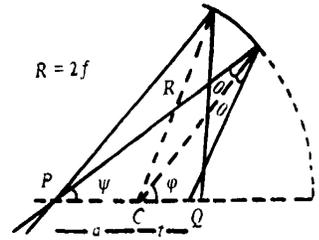


Fig. 1 Off-axis mirror line focus geometry

式中, R 为球面镜曲率半径, a 为 P 到圆心 C 的距离, θ, φ, t 分别为某一光线与对应球面镜法线夹角, 该法线与 PC 轴夹角以及该光线对应 Q 上一点到圆心 C 的距离, 如图 1 所示。线长可通过光线追迹求出。

2. 线聚焦系统的设计

“星光”激光装置上开展的 XRL 实验要求产生 25mm 长, 靶面功率密度大于 10^{13} W/cm^2 的焦线。针对实际光束发散角约 11 倍衍射极限的特点, 设计中, 我们用 $f = 250\text{mm}$ 的非球面透镜或离轴抛物面反射镜分别用于 ns 级和 ps 级脉冲产生直径约 $60\mu\text{m}$ 的点光源, 再经过曲率半径 $R = 221.14 \text{ mm}$, 离轴角 17.5° 的球面镜反射, 获得达到要求的线聚焦。这就建成了如图 2, 图 3 所示的透射-反射式和反射-反射式线聚焦系统。

设计中, 系统参数的计算可简化为^[5]:

$$L \approx 1.4 \times 10^{-4} \times (2\theta)^{-1} \times R / (F \cos 2\theta)$$

$$w \approx f \cdot \beta \cdot \cos(2\theta)$$

式中, L, w , 分别为线长、线宽, f 为非球面镜焦距, R 为球面镜曲率半径, $F = f/D$ 为相对孔径倒数, θ 为离轴角, 以度为单位。

三、焦线的特性分析

1. 线长、线宽及焦线纵横比

计算表明, 随着离轴角 θ 的增大, 线长迅速增加而线宽可以压窄, 因而焦线纵横比急剧增大。对于近衍射极限光束, 其线宽仅仅受限于衍射, 可以小到微米量级, 因而该系统很容易获得高纵横比焦线。图 4 给出了 10 倍衍射光线束的纵横比与离轴角的关系。

2. 线上光强分布

假设入射光近场分布是均匀的, 我们用 3D 光线追迹计算了圆形、方形光束的焦线上的光强分布, 如图 5 所示。结果表明, 该系统本身并未显著改善线长方向的光强非均匀性, 与文献

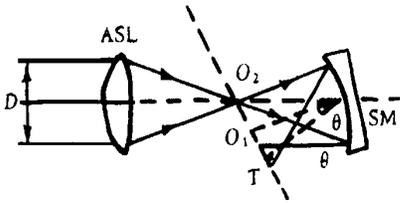


Fig. 2 A design of the transmitted-reflected line focus scheme

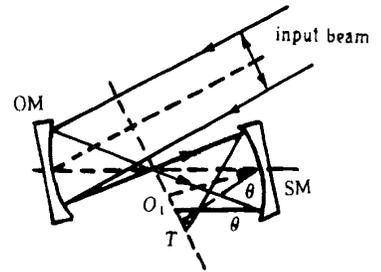


Fig. 3 A design of the reflected-reflected line focus scheme

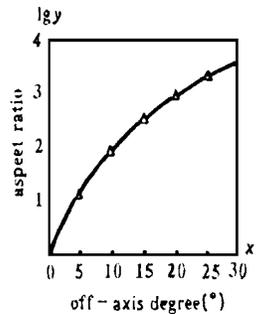


Fig. 4 Relationship between aspect ratio and off-axis degrees

[1~3]中提到的线聚焦系统相比,其光强分布不理想。但对于均匀性要求为25%的电子碰撞激发机制^[6],合理地选择系统参数,可以在80%的线上获得均匀性满足要求的焦线。得到较高的纵横比和靶面功率密度。便于中小型激光器开展较高Z值元素的XRL研究。

3. 改进线聚焦均匀性的措施

改善焦线光强均匀性的最简便的办法是改

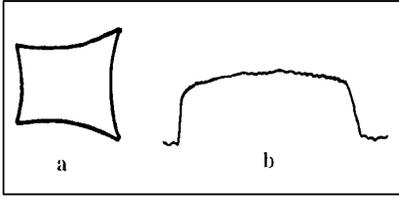


Fig. 6 Intensity distribution of line foci with special beam
a—a specially apertured beam b—scanned intensity distribution

措施。其一是利用变反射率反射镜(VRM)的原理,设计一种沿焦线方向一维变化的VRM镜,最大反射率的最大改变量为15%~20%,总体损耗~10%。计算表明,这种方法能极大地改善光强分布,同时又不过多地损失能量。另一措施为利用纯相位元件,用二元光学的方法来改善靶面光强分布。

四、线聚焦及XRL实验结果

1. 焦线特性的光学测试

(1)线宽的测量 线宽(和焦斑)的测量,一直是高功率固体激光中的难题。我们用铝镜作为记录介质,用不同能量的光入射,按列阵相机的原理,将焦线微分后再积分复原,如图7所示。实验测得占能量70%处的线宽为 $w = 0.042 \pm 0.005\text{mm}$ 。而同等情况下的点聚焦直径约为 $60\mu\text{m}$ 。这一结果表明该系统确有压窄线宽的功能。这一测量值与计算值吻合。

(2)焦线上光强分布的测量 用胶片作为记录介质,测量了实际激光束的焦线上的光强分布。图8给出了黑密度计扫描的线长、线宽方向的光强分布。结果表明,由于激光束近场存在调制,焦线长的光强分布并不光滑,但可以看出,约80%的焦线的非均匀性小于25%,满足了实验要求。

2. 焦线特性的物理测试

用针孔相机和双狭缝相机分别从靶的侧面与正上方测了激光与靶相互作用产生的软X射线象,如图9所示。其中针孔相机的针孔为 $15\mu\text{m}$,放大率17.7倍。水平狭缝与垂直狭缝分别为 $12\mu\text{m}$ 与 $30\mu\text{m}$ 。放大率:水平0.708倍,竖直:3.1倍。由于等离子体的运动,因此,这些

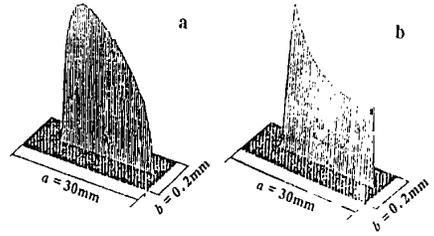


Fig. 5 3D tracing through the system of Fig. 2
a—circular beam b—square beam

变光束形状^[5,7]。经过逆光线追迹计算,我们选用了如图6a所示的异形光阑,用于“星光”激光装置,并实测了靶面光强分布,结果如图6b所示。可以看出这种方案的均匀化效果还是十分明显的。但由于该光阑同时也带来了30%~40%的能量损失,为了保证靶面足够高的功率密度,我们没有采取该方案。另一种改进措施为文献[7]所述的反射式光楔列阵法,由于加工复杂,造价高,同样未实际应用。目前,我们正在考虑两种改进

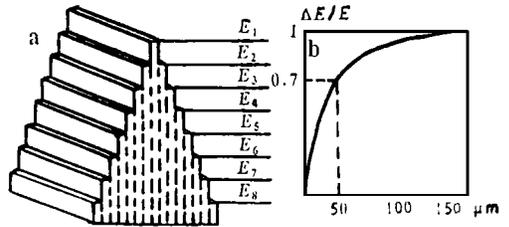


Fig. 7 Measurement of line width
a—illustration of the theory b—measurement result

象的大小,强度都依赖于入射光功率密度。作为参考,其典型的线宽测量结果为 $40\mu\text{m}$ 。这表明,该系统完全达到设计要求。

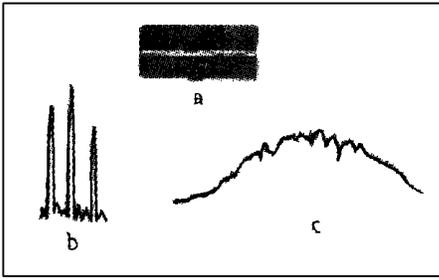


Fig. 8 A typical experimental result of line foci
a—image of line foci b—distribution along line width c—distribution along line

3. XRL 实验结果

以图 2 所示的线聚焦系统为基础,发展了相应的靶架和靶定位系统,建立了 XRL 实验专用靶场。开展了单脉冲、双脉冲泵浦类氖离子电子碰撞激发机制的 XRL 实验研究,取得了良好的结果。主要结果为: (1) 双脉冲泵浦, Ne like Ti, $J = 0 \sim 1$ 跃迁单线 X 光激光出光,并在最低能量 50J, 脉宽 650ps 的激光泵浦下出光。其 GL 值达 3.3。这一结果,标志着我国在单线 X 射线激光研究中跨入世界先进行列,并创下了泵浦能量最低的记录。(2) 双脉冲泵浦, Ne like Zn, $J = 0 \sim 1$ 跃迁单线 X 光激光出光,其跃迁强度明显高于其它谱线。(3) 单脉冲泵浦, Ne like Ge, Ne like Zn, $J = 2 \sim 1$ 跃迁 X 光激光出光。

五、结 束 语

综上所述,离轴球面反射式线聚焦系统具有线长可调,线宽可压窄,纵横比高等特点。其线上光强分布尽管不理想,但只要合理选择参数,可以在很大程度上获得均匀性优于 25% 的焦线,用于电子碰撞激发机制类的 XRL 实验。对系统作适当的改进,如用 VRM 镜,引入纯相位元件等,可以有效地改善光强分布,用于其它 XRL 实验。该系统还具有结构简单,造价低等特点,比较适合于在中小型激光器上应用,为 XRL 研究中器件小型化提供了一个发展方向。

本工作得到了英国牛津大学张杰教授、本实验室满永庄副研究员、尤永禄副研究员的大力帮助和指导,在此表示感谢!

参 考 文 献

- 1 陈万年,王树森,陈 斌 *et al.* 光学学报, 1991; 11(9): 829~ 833
- 2 丘 悦,黄宏一,范滇元 *et al.* 光学学报, 1994; 14(9): 1190~ 1203
- 3 Uilleneuve D M, Enright G D, Baldis H A. Opt Commun, 1991; 81(12): 54~ 57
- 4 Roos I N, Hodgson E M. J Phys E: Sci Instrum, 1985; 18: 169~ 173
- 5 Ross I N, Boon J, Corbett R *et al.* Appl Opt, 1987; 26(9): 1584~ 1588
- 6 淳于书泰,沈华忠,何绍堂 *et al.* 强激光与粒子束, 1990; 2(3): 279~ 290
- 7 冯国英,吕百达,蔡邦维. 激光技术, 1995; 19(3): 164~ 170

* * *

作者简介:袁晓东,男,1966 年出生。助理研究员,现为四川联大在读硕士生。从事高功率固体激光方面的研究工作。

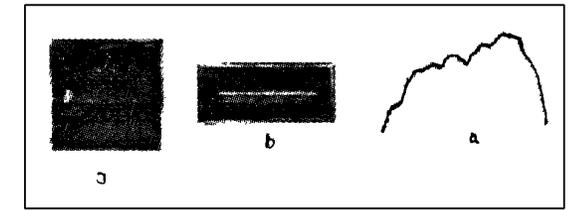


Fig. 9 Typical plasma X-ray image obtained by pin-hole camera and double slit camera
a—image by pin-hole b—image by double slit c—longitudinal microdensitometer scanning trace